

Miroshnikov A, Sidorov E, Smolensky A. Prediction of work power at the level of maximum oxygen consumption under aerobic loads used for hypertrophy of skeletal muscles in strength sports events. *Science in Olympic Sport*. 2019; 1:66-72. DOI:10.32652/olympic2019.1_8

Мирошников А, Сидоров Е, Смоленский А. Прогнозирование мощности работы на уровне максимального потребления кислорода при аэробных нагрузках, применяемых для гипертрофии скелетной мускулатуры в силовых видах спорта. *Наука в олимпийском спорте*. 2019; 1:66-72. DOI:10.32652/olympic2019.1_8

Прогнозирование мощности работы на уровне максимального потребления кислорода при аэробных нагрузках, применяемых для гипертрофии скелетной мускулатуры в силовых видах спорта

Александр Мирошников, Евгений Сидоров, Андрей Смоленский
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет физической культуры, спорта, молодежи и туризма»,
Москва, Российская Федерация

Prediction of work power at the level of maximum oxygen consumption under aerobic loads used for hypertrophy of skeletal muscles in strength sports events

Alexander Miroshnikov, Evgeny Sidorov, Andrey Smolensky

ABSTRACT. It is known that aerobic exercises have a minimal effect on skeletal muscle mass, and therefore, compared with the results of studying the effect of strength exercises on muscle fiber, there is an insufficient amount of scientific researches. In this work we attempted to compare the effectiveness of the impact on the rearrangement of muscle fiber of exercises performed through various, often opposed to each other, training means-exercises performed on the simulator for the so-called cyclic aerobic work (cycle ergometer) and strength exercises with a barbell. Data on the power of pedaling at the $\dot{V}O_2$ max level can be obtained by measuring by a direct method, by gasometric analysis and a step test, or by using prognostic equations. The question of applying such equations, which could predict the power of pedaling, in revising the existing views on the impact of aerobic training in relation to the mass of skeletal muscles is very relevant, but among representatives of strength sports is insufficiently studied.

Objective. Revision of existing views on the impact of aerobic training in relation to skeletal muscle mass based on the development and application of the prognostic equation for determining the power of pedaling at the $\dot{V}O_2$ max level in representatives of strength sports events.

Methods. Analysis and generalization of literary sources, pedagogical, biomedical methods, methods of mathematical statistics and regression analysis.

Results. Analysis and generalization of the literary sources showed that correctly performed aerobic exercises lead to hypertrophy of skeletal muscles, which is comparable with strength training. It is proved that the developed prognostic equation helps to predict the pedaling power at the $\dot{V}O_2$ max level while working on a bicycle ergometer and has a high correlation with the results of the direct measurement method, whereas the approach itself has several advantages over expensive testing procedures.

Conclusions. In contrast to the existing view that aerobic work reduces the physiological cross-section of skeletal muscles, whereas strength one increases it, the paper shows that loads with weights and cyclic exercises are the means of recruiting muscle fibers, and the intensity of exercises (method or methodics) allows to trigger all the stimuli of muscle growth.

Keywords: aerobic work, muscle hypertrophy, bodybuilding, powerlifting, crossfit.

Прогнозування потужності роботи на рівні максимального споживання кисню при аеробних навантаженнях, що застосовуються для гіпертрофії скелетної мускулатури в силових видах спорту

Олександр Мірошников, Євгеній Сидоров, Андрій Смоленський

АНОТАЦІЯ. Аеробні вправи, як відомо, чинять мінімальний вплив на масу скелетних м'язів, тому, порівняно з результатами вивчення впливу силових вправ на м'язове волокно, є недостатня кількість наукових досліджень. У даній роботі зроблено спробу порівняння ефективності впливу на перебудову м'язового волокна вправ, що виконуються за допомогою різних, що часто протиставляються один одному тренувальних засобів, – вправ, що виконуються на тренажері для так званої циклічної аеробної роботи (велотренажер) і вправ силового характеру зі штангою. Дані з потужності педалювання на рівні $\dot{V}O_2$ max можна отримати під час вимірювання прямим методом, шляхом газометричного аналізу і ступінчастого тесту або при використанні прогностичних рівнянь. Питання застосування таких рівнянь, які б могли прогнозувати потужність педалювання, під час перегляду існуючих поглядів на вплив аеробних тренувань відносно маси скелетних м'язів дуже актуальне, але у представників силових видів спорту недостатньо вивчене.

Мета. Перегляд існуючих поглядів на вплив аеробних тренувань відносно маси скелетних м'язів на основі розробки і застосування прогностичного рівняння для визначення потужності педалювання на рівні $\dot{V}O_2$ max у представників силових видів спорту.

Методи. Аналіз і узагальнення джерел літератури, педагогічні, медико-біологічні методи, методи математичної статистики і регресійного аналізу.

Результати. Аналіз і узагальнення джерел літератури показали, що правильно виконані аеробні вправи призводять до гіпертрофії скелетних м'язів, що можна порівняти з силовими тренуваннями. Доведено, що розроблене прогностичне рівняння допомагає прогнозувати потужність педалювання на рівні $\dot{V}O_2$ max під час роботи на велоергометрі і має високу кореляцію з результатами прямого методу вимірювання, а сам підхід має ряд переваг перед дорогими процедурами тестування.

Висновок. На відміну від сформованого уявлення про те, що аеробна робота зменшує фізіологічний поперечник скелетних м'язів, а силова, навпаки, збільшує, показано, що і навантаження з обтяженнями, і вправи циклічного характеру є засобами рекрутування м'язового волокна, а інтенсивність вправ (метод або методика) дозволяє запустити всі стимули м'язового росту.

Ключові слова: аеробна робота, м'язова гіпертрофія, бодибілдінг, пауерліфтинг, кросфіт.

Постановка проблемы. Исторически считалось, что аэробные упражнения оказывают минимальное влияние на массу скелетных мышц, и поэтому по данному вопросу, по сравнению с результатами изучения влияния на мышечное волокно силовых упражнений, количество научных исследований на сегодня недостаточно для формирования единой обоснованной позиции авторов.

В своем историческом обзоре по силовому тренингу W.J. Kraemer и соавт. [32] показали, как развивалась научная мысль по влиянию аэробной работы на гипертрофию рабочих мышц. После появления в 1980-х годах ряда работ в теории и практике силовой подготовки произошло четкое разделение тренировочных методов: силового тренинга (strength training) и тренинга выносливости (endurance training) [15, 25]. Здесь следует сделать оговорку – исследователи понимают, что существуют различные классификации физических упражнений, например, по биомеханическому признаку, по энергетической стоимости, по типу мышечных сокращений, по режиму энергообеспечения и прочие. Однако попытка спортивных биохимиков провести демаркационную линию между аэробной и анаэробной работой не увенчалась успехом, поскольку современные данные показывают, что анаэробный гликолиз и образование лактата в организме человека происходят и в полностью аэробных условиях [5, 7].

Исходя из этого, нами в данной работе предпринята попытка сравнения эффективности влияния на перестройку мышечного волокна упражнений, выполняемых с помощью различных, часто противопоставляемых друг другу, тренировочных средств – упражнений, выполняемых на тренажере для так называемой циклической аэробной работы (велотренажер) и упражнений силового характера со штангой. В рисунках к визуальному пониманию процессов, происходящих во время симультанной работы, обычно используют два символа: гантели и велосипед [12]. Согласно данным недавнего метаанализа, проведенного Z. Murlasits и соавт. [36], нужно полагать, что если основной целью является увеличение мышечной силы нижней части тела, настоятельно рекомендуется выполнять силовое упражнение перед тренировкой на выносливость при симультанной тренировочной программе, т.е. в развитии силы мышц также происходит разделение на силовую работу и конкурирующую тренировку выносливости. В мышлении тренеров, биологов и специалистов спортивной медицины символы «штанга/гантели» и «велосипед» как никогда начинают носить абсолютно противоположные значения, когда речь заходит о достижении мышечной гипертрофии. Стоит ли разделять эти символы и идентичны ли стимулы от этих тренажеров для скелетных мышц?

Хотя во многих исследованиях были идентифицированы различные белки и молекулярные механизмы, которые регулируют мышечную массу, два ключевых вопроса остались без ответа. Первый вопрос: каковы

первичные стимулы гипертрофии, которые запускают гипертрофическую передачу сигнала и гипертрофию мышечных волокон в ответ на двигательную активность, и какая структура изначально считывает/распознает эти стимулы? Второй вопрос: может ли аэробная тренировка создать эти первичные стимулы для гипертрофии скелетных мышц?

Для условий активизации синтеза миофибрилярного белка мышечной ткани многие исследователи выделяют ряд важных и необходимых: «факторов гипертрофии» [3], «стимулов гипертрофии» (hypertrophy stimulus) и «датчиков гипертрофии» (hypertrophy sensor) [51]. Фактор, или стимул, гипертрофии – это причина и движущая сила процесса, определяющая его характер или отдельные черты характера. Без такого фактора, или иницирующего стимула, достаточной величины и продолжительности невозможно вызвать гипертрофическую реакцию скелетных мышц на физическую нагрузку.

Среди датчиков (рецепторов) гипертрофии мышечного волокна выделяют такие механические датчики, как дистрофин-ассоциированные гликопротеиновые комплексы¹ (ДАГ-комплексы, или костамеры) [39], титин [52], filamin-C Bag3 [42], Yap [53], позволяющие мышечным волокнам во время и после двигательной активности воспринимать механические сигналы, которые запускают передачу этих сигналов и последующую гипертрофию скелетных мышц. Из возможных факторов/стимулов мышечной гипертрофии в современной литературе концептуально выделяют механические и метаболические стимулы. Среди механических стимулов основным является стимул повреждения мышц, вызванный физической нагрузкой [27]. К метаболическим же стимулам относят гипоксический стимул [47]; метаболический стресс, который сопровождается повышенной концентрацией метаболитов (ионов H⁺/лактата [37] и низкой концентрацией креатинфосфата); изменения концентраций/активностей гликолитических ферментов (HEK293, GAPDH, фосфоорилаза и фосфофруктокиназа) [33]; наличие адекватного пула аминокислот, прежде всего, лейцина [29], в крови; и, наконец, повышенную концентрацию анаболических стероидных гормонов [34].

Несмотря на продолжающуюся дискуссию относительно метаболического стресса как стимула мышечной гипертрофии, все исследователи сходятся в одном, что основным стимулом синтеза миофибрилярного белка

¹Дистрофин – структурный стержневидный белок, содержащийся в цитоплазме клеток, который является основной составляющей дистрофин-ассоциированного гликопротеинового комплекса (ДАГ-комплекса), соединяющего цитоскелет мышечных волокон с окружающим его внеклеточным матриксом. При мышечном сокращении длина молекулы дистрофина меняется, ее складчатая структура выполняет функцию пружины, что позволяет не подвергать мембраны миоцитов, структуры за их пределами, соединительные ткани, а также сухожилия избыточной механической нагрузке. Этот белок также регулирует поддержание уровня внутриклеточного кальция и осуществляет контроль над ростом скелетных мышц (*прим. ред.*).

в его основной физиологической природе является возможность рекрутирования мышечных волокон именно с помощью двигательной активности. При этом любые физические упражнения, которые способны привести к возможному максимальному набору двигательных единиц, особенно высокопороговых, будут индуцировать повышенную чувствительность синтеза миофибриллярного белка к пищевым аминокислотам в течение длительного периода времени [9]. Действительно, объем или время нахождения двигательных единиц под напряжением способствует более продолжительному повышению уровня синтеза белка и гипертрофии рабочих мышц [8]. Учитывая четко установленную зависимость «доза-реакция» между объемом тренировочной нагрузки и выраженностью гипертрофии мышечного волокна [45], любые виды тренировочных протоколов, которые позволят максимально долго держать под нагрузкой высокопороговые двигательные единицы, будут индуцировать активацию синтеза миофибриллярного белка [19].

В своей предыдущей работе [2] нами был проведен сравнительный анализ результатов электромиографии во время велоэргометрии и приседаний со штангой и показано, что активность прямой мышцы бедра (*m. rectus femoris*), медиальной головки квадрицепса (*m. vastus medialis*) и латеральной головки квадрицепса (*m. vastus lateralis*) возрастала по мере увеличения мощности педалирования и при 140 % мощности педалирования на уровне $\dot{V}O_2\max$ сравнивалась с электромиографической активностью при приседаниях со штангой на один повторный максимум. Данные по мощности педалирования на уровне $\dot{V}O_2\max$ можно получить при измерении прямым методом, путем газометрического анализа и ступенчатого теста или при использовании прогностических уравнений. Анализ и обобщение источников литературы показали, что вопрос применения таких уравнений, которые бы могли прогнозировать мощность педалирования, при пересмотре существующих воззрений относительно влияния аэробных тренировок в отношении массы скелетных мышц очень актуален, но у представителей силовых видов спорта недостаточно изучен. На основании анализа проблемной ситуации, данных современной научной литературы и запросов спортивных врачей, тренеров и преподавателей была сформулирована цель исследования.

Цель исследования – пересмотр существующих воззрений относительно влияния аэробных тренировок в отношении массы скелетных мышц на основе разработки и применения прогностического уравнения для определения мощности педалирования на уровне $\dot{V}O_2\max$ у представителей силовых видов спорта.

Методы и организация исследования. Исследование проходило на базе кафедры спортивной медицины Российского государственного университета физической культуры, спорта, молодежи и туризма. В исследовании приняли участие 43 представителя си-

ловых видов спорта (тяжелая атлетика, пауэрлифтинг, бодибилдинг), имеющих спортивную квалификацию КМС, МС, МСМК. Средний возраст спортсменов-мужчин составил $32,0 \pm 8,6$ года. Все участники исследования дали добровольное информированное согласие на участие в эксперименте согласно Хельсинкской декларации [22].

Выполнение поставленных в работе задач осуществлялось с помощью следующих методов. У всех спортсменов перед началом и по окончании исследования проводили комплексное обследование, включающее опрос, осмотр, определение индекса массы тела (ИМТ), биоимпедансометрию, при которой оценивали процент мышечной и жировой ткани, индекс жировой массы тела (FMI) и индекс тощей массы тела (FFMI), газометрический анализ (определение $\dot{V}O_2\max$ и мощности педалирования на этом уровне), методы математической статистики и регрессионного анализа.

После биоимпедансометрии спортсменам проводили следующие динамические замеры частоты сердечных сокращений (ЧСС):

- 1) ЧСС покоя (сидя);
- 2) ЧСС после принятия вертикального положения (через 10 с);
- 3) ЧСС через 1 мин ходьбы на тредмиле (скорость $5 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$; угол наклона 0°);
- 4) ЧСС через 2 мин ходьбы на тредмиле (скорость $5 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$; угол наклона 0°);
- 5) ЧСС восстановления (стоя) через 1 мин;
- 6) ЧСС восстановления (стоя) через 2 мин.

После тестирования на тредмиле участникам исследования было предложено выполнить ступенчатый тест на велоэргометре «MONARK 839 E» (Monark AB, Швеция). Нагрузку задавали, начиная с 20 Вт с прибавлением по 20 Вт каждые 2 мин. Газометрический анализ проводили с использованием газоанализатора «CORTEX» (Meta Control 3000, Германия), выполняющего измерение потребления кислорода и выделения углекислого газа от вдоха к выдоху. Частоту сердечных сокращений и R-R интервалы фиксировали с помощью монитора сердечного ритма «POLAR RS800» (Финляндия). Тест выполняли в темпе $75 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$ до определения $\dot{V}O_2\max$ и мощности работы на уровне $\dot{V}O_2\max$.

Результаты исследования. Данные биоимпедансометрии и расчетов индексов антропометрии показывают, что у представителей силовых видов спорта в среднем достаточно высокий процент жировой массы, что отображается повышенным индексом FMI, и высокое значение тощей (мышечной) массы тела (табл. 1), что существенно превышает аналогичные значения, например, у футболистов Футбольной национальной лиги, у которых FMI составляет $2,7 \pm 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$, а FFMI – $21,0 \pm 0,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ [1]. По данным источников литературы, квалифицированные представители силовых видов спорта, не использующие анаболические стероиды, имеют верхний предел FFMI ($25 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$) [31].

ТАБЛИЦА 1 – Антропометрические данные обследованных спортсменов – представителей силовых видов спорта (n = 43)

Рост, см	Масса, кг	ИМТ, кг·м ⁻²	FMI, кг·м ⁻²	FFMI, кг·м ⁻²
180,4 ± 5,7	102,3 ± 8,5	31,5 ± 2,9	6,8 ± 2,2	24,7 ± 2,0

В результате тестирования и последующих расчетов было получено линейное уравнение, имеющее следующий вид:

$$N = K + \sum (x_i a_i),$$

где N – мощность педалирования при $\dot{V}O_{2max}$ (Вт), K – расчетная константа, равная –13198,5, x_i – измеряемые параметры, a_i – соответствующие им коэффициенты, отраженные в таблице 2.

Использование данной формулы позволило с высокой точностью предсказать мощность педалирования на велотренажере у мужчин, для которых известны параметры, приведенные в таблице 2. Коэффициент корреляции между прогнозируемым значением параметра и измеренной прямым методом мощностью педалирования на уровне $\dot{V}O_{2max}$ составил 0,905 ($p < 0,05$).

Таким образом, разработанное уравнение линейной регрессии помогает прогнозировать мощность педалирования на уровне $\dot{V}O_{2max}$ при работе на велоэргометре. Результаты, полученные при использовании расчетного уравнения регрессии, имеют высокую корреляцию с данными прямого метода измерения, и сам подход имеет ряд преимуществ перед дорогостоящими процедурами тестирования. Зная мощность педалирования на уровне $\dot{V}O_{2max}$, представители силовых видов спорта смогут выстраивать тренировочные интервальные программы на велоэргометре, где критерием высокоинтенсивного интервала может быть 140 % мощности педалирования при $\dot{V}O_{2max}$, где происходит активация высокопороговых двигательных единиц.

Обсуждение результатов. Среди атлетов в силовых видах спорта считается, что аэробная тренировка тормозит рост мышечной массы, силы и мощности работы, вызванных силовой тренировкой [18, 35]. Однако с применением методов визуализации высокого разрешения (например, компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии) появляется все больше доказательств того, что аэробные нагрузки также вызывают гипертрофию скелетных мышц [10, 30, 43]. Проведя анализ современных источников литературы относительно стимулов мышечной гипертрофии, которые способны вызывать упражнения со штангой и на велоэргометре, можно сделать ряд выводов.

Во-первых, что касается метаболического стресса, а именно накопления метаболитов, которые обладают анаболическими сигнальными свойствами, известно, что около 2700 метаболических ферментов катализируют около 900 метаболических реакций и что около 4000

метаболитов можно обнаружить только в сыворотке крови человека [51]. Поэтому многие исследователи в последнее время предположили, что такие метаболиты, как лактат и неорганический фосфат, не являются обязательными для роста мышц, но обеспечивают механизм дополнительного рекрутинга двигательных единиц, что позитивно сказывается на мышечной гипертрофии [13]. Однако работы последних лет [11, 40, 41, 49] показывают, что накопление лактата может, даже при низкоинтенсивном тренинге, приводить к эффективному увеличению мышечной массы, сопровождающемуся повышением количества мионуклеинов, через активированные спутниковые клетки и анаболические сигналы. Циклическая работа аэробного характера выше анаэробного порога существенно повышает кислотность мышц и содержание лактата в крови, причем высокоинтенсивные интервалы исчерпывают запасы креатинфосфата высокопороговых единиц, что приводит к повышенной концентрации свободного креатина в цитоплазме мышечной клетки и формированию соответствующего сигнала для м-РНК [14, 16].

Во-вторых, хотя гормональная гипотеза и получила значительную поддержку в научной литературе, современные исследователи, такие, как B. J. Schoenfeld [46], D. W. West, S. M. Phillips [54] и J. Fink et al. [17], ставят под сомнение ее достоверность. Они утверждают, что повышенный уровень тестостерона во время и после интенсивной мышечной деятельности не стимулирует синтез миофибрилярного белка и не является необходимым для мышечной гипертрофии. Однако G. T. Mangine, J. R. Hoffman в своей работе в 2018 г. [34] показали, что традиционные статистические методы не позволяют адекватно оценить взаимосвязь между несколькими переменными, которые существуют во времени, и продемонстрировали уникальный метод анализа этих типов отношений без необходимости преобразования данных.

ТАБЛИЦА 2 – Таблица коэффициентов прогностического уравнения

№ п/п	Изменяемый параметр, x_i	Коэффициент, a_i
1	Возраст, лет	-2,4796
2	Масса тела, кг	-61,8319
3	Рост, см	72,5073
4	ЧСС покоя, уд·мин ⁻¹	-2,06978
5	ЧСС стоя, уд·мин ⁻¹	4,98485
6	ЧСС ходьбы через 1 мин, уд·мин ⁻¹	-4,99115
7	ЧСС ходьбы через 2 мин, уд·мин ⁻¹	1,01815
8	ЧСС восстановления, стоя через 1 мин, уд·мин ⁻¹	-3,63076
9	ЧСС восстановления, стоя через 2 мин, уд·мин ⁻¹	1,9998
10	ИМТ, кг·м ⁻²	86,0692
11	FMI, кг·м ⁻²	135,138
12	FFMI, кг·м ⁻²	137,308
13	Тренировочный стаж, лет	2,73814

В этом исследовании авторы также показали, что после восьми недель тренировок гормональный отклик на силовые упражнения связан с гипертрофией мышц и, в частности, что увеличение концентрации тестостерона, вызванное упражнениями, более значительно влияет на гипертрофию скелетных мышц, чем уровень секреции других гормонов. В результате интенсивных аэробных сессий происходит повышение уровня тестостерона, и этот высокий уровень удерживается до 60 мин. Причем, чем больше мощность аэробной работы, тем выше уровень тестостерона отмечается как у молодых людей, так и лиц пожилого возраста [23, 24, 44].

На основании результатов проведенного в 2018 г. мета-анализа [20] утверждается, что при аэробных тренировках на велосипеде для мышечной гипертрофии требуется значительное количество мышечных сокращений (от 118 до 145 тыс. сокращений на нижнюю конечность); при этом необходимое время составит от 30 до 45 мин. Авторы мета-анализа сравнивают такой вид активности с силовой работой, которая вызывает гипертрофию мышц разгибателей колена всего за 5–10 мин. Однако мы не обнаружили в данном аналитическом исследовании описания сопоставимых степеней нагрузок и уровней активации мышечного волокна.

Наши наблюдения показывают, что если спортсмен будет вращать велоэргометр 30–45 мин, то мощность его педалирования будет ниже мощности анаэробного порога (такая работа осуществляется волокном типа I и частично волокном типа IIa). Силовая работа, выполняемая на уровне 80 % одного повторного максимума, и зачастую до мышечного отказа, рекрутирует все двигательные единицы, а, главное, мышечные волокна типа IIb, которые интенсивнее всего отвечают на соответствующие стимулы гипертрофией [4, 38].

Также несопоставимыми являются польза и травматизм от силовой и аэробной тренировки. В исследовании, где были опрошены 104 человека, в программу тренировочных занятий которых было включено систематическое выполнение многосуставных упражнений (приседание со штангой, становая тяга и жим лежа), были получены следующие результаты относительно распространенных среди обоих полов спортсменов травм, вызывающих болевой синдром или препятствующих тренировочному процессу. Согласно результатам проведенного среди обследованных мужчин ($n = 51$) и женщин ($n = 53$) опроса, 70 % сообщили о нынешней травме, а 87 % сообщили, что получили травмы в течение года. Травмы были локализованы в следующих областях: тазобедренный сустав, поясничный и шейный отделы позвоночника, коленный сустав, плечевой сустав [48]. Также в своем обзоре 2018 г. V. Bengtsson и соавт. [6] сообщили, что 22–32 % травм в силовых видах спорта связаны с приседаниями со штангой (разрывы

мышц и сухожилий нижних конечностей, разрыв межпозвоночных дисков, переломы шеи и стопы), 18–46 % травм приходится на жим штанги лежа (разрывы мышц, особенно большой грудной мышцы, переломы ключицы, ребер и верхних конечностей, остеолит акромиально-ключичного сустава, вывих плечевого сустава и тендинопатия) и 12–31 % травм – на тягу штанги (переломы, разрывы мышц, различные повреждения нижней части спины и менисков, спондилолиз, воспаления седалищного нерва и повреждение связок позвоночника, грудопоясничной фасции и нервов спинномозговых ветвей).

Выводы. Анализ и обобщение источников современной научной литературы позволили нам ответить на ключевые вопросы относительно того, может ли аэробная тренировка создать первичные стимулы для гипертрофии скелетных мышц и способно ли мышечное волокно увеличивать свои размеры и становиться сильнее при сохранении окислительных способностей. Это, во-первых, зависит от применения соответствующих стимулов (т.е. устойчивой сократительной активности в сочетании с короткой, мощной механической нагрузкой) и доступности строительных материалов и незаменимых субстратов (например, аминокислот) для поддержания скорости синтеза мышечного белка; во-вторых, от способности увеличивать транспорт кислорода (например, путем улучшения функции сердца и легких или ангиогенеза, гематокрита и миоглобина); в-третьих, от профилактики тканевой гипоксии и хронического снижения клеточного энергетического статуса [50]. Наш тезис относительно способности циклической тренировки выше анаэробного порога вызывать гипертрофию рабочих мышц подтверждается рядом исследований [21, 26, 28]. Разработанное нами прогностическое уравнение помогает прогнозировать мощность работы на уровне $\dot{V}O_{2max}$ при работе на велоэргометре, что позволит представителям силовых видов спорта использовать этот вид тренинга для гипертрофии мышц разгибателей голени и профилактики сердечно-сосудистых заболеваний. Данный метод расчета имеет высокую корреляцию с результатами прямого метода измерения, и сам подход имеет ряд преимуществ перед затратными по времени, болезненными (например, лактацидный метод) и дорогостоящими процедурами тестирования.

Благодарности. Авторы благодарят Василия Волкова, Ксению Сергееву, Алексея Антонова и Александра Форменова (аспирантов РГУФКСМиТ) за помощь в написании статьи и работе с источниками литературы. Авторы сообщают, что не получали никакого финансирования и все затраты на исследование были личными вкладами авторов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что не существует никакого конфликта интересов.

■ Литература

1. Мирошников АБ, Волков ВВ. Состав тела и весоростовые индексы у футболистов «футбольной национальной лиги» [Body composition and weight-growth indices for football players of the «National Football League»]. *Тепаневм*. 2018;5:23-7.
2. Мирошников АБ, Волков ВВ, Смоленский АВ, Манидичев СН, Антонов АГ, Форменов АД, Агапкин СН. Симультианная физическая нагрузка для мышечной гипертрофии: средства и методы воздействия [Simultaneous physical activity for muscle hypertrophy: means and methods of exposure]. *Тепаневм*. 2018;11:4-12.
3. Селуянов ВН. Подготовка бегуна на средние дистанции [Preparing a middle distance runner]. *СпортАкадемПресс*. 2001:31-5.
4. Adams G, Bamman MM. Characterization and regulation of mechanical loading-induced compensatory muscle hypertrophy. *Compr Physiol*. 2012;2(4):2829-70.
5. Bendahan D, Chatel B, Jue T. Comparative NMR and NIRS analysis of oxygen-dependent metabolism in exercising finger flexor muscles. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2017;313(6):R740-R753.
6. Bengtsson V, Berglund L, Aasa U. Narrative review of injuries in powerlifting with special reference to their association to the squat, bench press and deadlift. *BMJ Open Sport Exerc Med*. 2018;4(1):1-8.
7. Brooks GA. The Science and Translation of Lactate Shuttle Theory. *Cell Metab*. 2018;27(4):757-85.
8. Burd NA, Andrews RJ, West DW, Little JP, et al. Muscle time under tension during resistance exercise stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses in men. *J Physiol*. 2012;590(2):351-62.
9. Burd NA, West DW, Moore DR, Atherton PJ, Staples AW, Prior T, Tang JE, Rennie MJ, Baker SK, Phillips SM. Enhanced amino acid sensitivity of myofibrillar protein synthesis persists for up to 24 h after resistance exercise in young men. *J Nutr*. 2011;141: 568-73.
10. Ceccarelli G, Benedetti L, Arcari ML, Carubbi C, Galli D. Muscle stem cell and physical activity: What point is the debate at? *Open Med (Wars)*. 2017;12:144-56.
11. Cerda-Kohler H, Henriquez-Olguin C, Casas M, Jensen TE, Llanos P, Jaimovich E. Lactate administration activates the ERK1/2, mTORC1, and AMPK pathways differentially according to skeletal muscle type in mouse. *Physiol Rep*. 2018;6(18):e13800.
12. Coffey VG, Hawley JA. Concurrent exercise training: do opposites distract? *J Physiol*. 2017;595(9):2883-96.
13. Dankel SJ, Mattocks KT, Jessee MB, Buckner SL, Mouser JG, Loenneke JP. Do metabolites that are produced during resistance exercise enhance muscle hypertrophy? *Eur J Appl Physiol*. 2017;117(11):2125-35.
14. Denham J, Scott-Hamilton J, Hagstrom AD, Gray AJ. Cycling power outputs predict functional threshold power and maximum oxygen uptake. *J Strength Cond Res*. 2017;11:1-29.
15. Dudley GA, Djamil R. Incompatibility of endurance- and strength-training modes of exercise. *J Appl Physiol (1985)*. 1985;59:1446-51.
16. Eigendorff J, May M, Friedrich J, Engeli S, Maassen N, Gros G, Meissner JD. High intensity high volume interval training improves endurance performance and induces a nearly complete slow-to-fast fiber transformation on the mRNA level. *Front Physiol*. 2018;9:601, 1-14.
17. Fink J, Schoenfeld BJ, Nakazato K. The role of hormones in muscle hypertrophy. *Phys Sportsmed*. 2017;25:1-6.
18. Gentil P, de Lira CAB, Paoli A, Dos Santos JAB, da Silva RDT, Junior JRP, da Silva EP, Magosso RF. Nutrition, pharmacological and training strategies adopted by six bodybuilders: case report and critical review. *Eur J Transl Myol*. 2017;27(1):6247, 51-66.
19. Grgic J, Lazineca B, Mikulic P, Schoenfeld BJ. Should resistance training programs aimed at muscular hypertrophy be periodized? A systematic review of periodized versus non-periodized approaches. *Sci sports* 2017:1-9.
20. Grgic J, McIlvenna LC, Fyfe JJ, Sabol F, Bishop DJ, Schoenfeld BJ, Pedisic Z. Does aerobic training promote the same skeletal muscle hypertrophy as resistance training? A systematic review and meta-analysis. *Sports Med*. 2018;20:1-22.
21. Harber MP, Konopka AR, Udem MK, Hinkley JM, Minchev K, Kaminsky LA, Trappe TA, Trappe S. Aerobic exercise training induces skeletal muscle hypertrophy and age-dependent adaptations in myofiber function in young and older men. *J Appl Physiol (1985)*. 2012;113(9):1495-504.
22. Harriss DJ, Atkinson G. Ethical standards in sport and exercise science research: 2016 Update. *Int J Sports Med*. 2015;36:1121-4.
23. Hayes LD, Herbert P, Sculthorpe NF, Grace FM. Exercise training improves free testosterone in lifelong sedentary aging men. *Endocr Connect*. 2017;6(5):306-10.
24. Herbert P, Hayes LD, Sculthorpe NF, Grace FM. HIIT produces increases in muscle power and free testosterone in male masters athletes. *Endocr Connect*. 2017;6(7):430-6.
25. Hickson RC. Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur J Appl Physiol*. 1980;45:255-63.
26. Hudelmaier M, Wirth W, Himmer M, et al. Effect of exercise intervention on thigh muscle volume and anatomical cross-sectional areas: quantitative assessment using MRI. *Magn Reson Med*. 2010;64(6):1713-20.
27. Hyldahl RD, Hubal MJ. Lengthening our perspective: morphological, cellular, and molecular responses to eccentric exercise. *Muscle & nerve*. 2014;49:155-70.
28. Izquierdo M, Häkkinen K, Ibáñez J, Kraemer WJ, Gorostiaga EM. Effects of combined resistance and cardiovascular training on strength, power, muscle cross-sectional area, and endurance markers in middle-aged men. *Eur J Appl Physiol*. 2005;94(1-2): 70-5.
29. Jakubowski JS, Wong EPT, Nunes EA, Noguchi KS, Vandeweerd JK, Murphy KT, Morton RW, McGlory C, Phillips SM. Equivalent hypertrophy and strength gains in β -Hydroxy- β -Methylbutyrate- or Leucine-supplemented men. *Med Sci Sports Exerc*. 2019;51(1): 65-74.
30. Konopka AR, Harber MP. Skeletal muscle hypertrophy after aerobic exercise training. *Exerc Sport Sci Rev*. 2014;42(2):53-61.
31. Kouri EM, Pope HG, Jr, Katz DL, Oliva P. Fat-free mass index in users and nonusers of anabolic-androgenic steroids. *Clin J Sport Med*. 1995;5:223-8.
32. Kraemer WJ, Ratamess NA, Flanagan SD, Shurley JP, Todd JS, Todd TC. Understanding the science of resistance training: an evolutionary perspective. *Sports Med*. 2017;47(12): 2415-35.
33. Lee MN, Ha SH, Kim J, Koh A, Lee CS, Kim JH, Jeon H, Kim D-H, Suh P-G, Ryu SH. Glycolytic flux signals to mTOR through glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase-mediated regulation of Rheb. *Molecular and cellular biology*. 2009;29:3991-4001.
34. Mangine GT, Hoffman JR. Exercise-induced hormone elevations are related to muscle growth. *J Strength Cond Res*. 2017:45-53.
35. Murach KA, Bagley JR. Skeletal muscle hypertrophy with concurrent exercise training: contrary evidence for an interference effect. *Sports Med*. 2016;46:1029-39.
36. Murlasits Z, Kneffel Z, Thalib L. The physiological effects of concurrent strength and endurance training sequence: A systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci*. 2018;36(11): 1212-9.
37. Nalbandian M, Takeda M. Lactate as a signaling molecule that regulates exercise-induced adaptations. *Biology (Basel)*. 2016;5(4):1-12.
38. Ntetreba A, Popov D, Bravyy Y, Lyubaeva E, Terada, M, Ohira T, Okabe H, Vinogradova O, Ohira Y. Responses of knee extensor muscles to leg press training of various types in human. *Russ Fiziol Zh I I M Sechenova*. 2013;99: 406-16.
39. Noorkoiv M, Nosaka K, Blazevich AJ. Effects of isometric quadriceps strength training at different muscle lengths on dynamic torque production. *Journal of sports sciences*. 2015;33:1952-61.
40. Ohno Y, Oyama A, Kaneko H, Egawa T, Yokoyama S, Sugiura T, Ohira Y, Yoshioka T, Goto K. Lactate increases myotube diameter via activation of MEK/ERK pathway in C2C12 cells. *Acta Physiol (Oxf)*. 2018;223(2):e13042.
41. Oishi Y, Tsukamoto H, Yokokawa T et al. Mixed lactate and caffeine compound increases satellite cell activity and anabolic signals for muscle hypertrophy. *J Appl Physiol Bethesda Md 1985*. 2015;118:742-9.
42. Potts GK, McNally RM, Blanco R, You J-S, Hebert AS, Westphall MS, Coon JJ, Hornberger TA. A map of the phosphoproteomic alterations that occur after a bout of maximal-intensity contractions. *The Journal of physiology*. 2017;595: 5209-26.
43. Rutkowska-Kucharska A, Szpala A. The use of electromyography and magnetic resonance imaging to evaluate a core strengthening exercise programme. *J Back Musculoskelet Rehabil*. 2018;31(2):355-62.
44. Sato K, Iemitsu M, Katayama K, Ishida K, Kanao Y, Saito M. Responses of sex steroid hormones to different intensities of exercise in endurance athletes. *Exp Physiol*. 2016;101(1): 168-75.

45. Schoenfeld BJ, Ogborn D, Krieger JW. Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: a systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci.* 2017;35:1073-82.
46. Schoenfeld BJ. Postexercise hypertrophic adaptations: a reexamination of the hormone hypothesis and its applicability to resistance training program design. *Journal of Strength and Conditioning Research.* 2013;27(6):1720-30.
47. Schoenfeld BJ. Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports medicine (Auckland, N Z).* 2013;43:179-94.
48. Strömback E, Aasa U, Gilenstam K, Berglund L. Prevalence and Consequences of Injuries in Powerlifting: A Cross-sectional Study. *Orthop J Sports Med.* 2018;6(5):67-75.
49. Tsukamoto S, Shibasaki A, Naka A, Saito H, Iida K. Lactate Promotes Myoblast Differentiation and Myotube Hypertrophy via a Pathway Involving MyoD In Vitro and Enhances Muscle Regeneration In Vivo. *Int J Mol Sci.* 2018;19(11):1-14.
50. van Wessel T, de Haan A, van der Laarse WJ, Jaspers RT. The muscle fiber type-fiber size paradox: hypertrophy or oxidative metabolism? *Eur J Appl Physiol.* 2010;110(4):665-94.
51. Wackerhage H, Schoenfeld BJ, Hamilton DL, Lehti M, Hulmi JJ. Stimuli and sensors that initiate skeletal muscle hypertrophy following resistance exercise. *J Appl Physiol (1985).* 2018;18:1-41.
52. Watt KI, Goodman CA, Hornberger TA, and Gregorevic P. The Hippo Signaling Pathway in the Regulation of Skeletal Muscle Mass and Function. *Exerc Sport Sci Rev.* 2018;46:92-6.
53. Watt KI, Turner BJ, Hagg A, Zhang 1249 X, Davey JR, Qian H, Beyer C, Winbanks CE, Harvey KF, Gregorevic P. The Hippo pathway effector YAP is a critical regulator of skeletal muscle fibre size. *Nature communications.* 2015;6:6048,1-13.
54. West DW, Phillips SM. Associations of exercise-induced hormone profiles and gains in strength and hypertrophy in a large cohort after weight training. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112:2693-702.

Автор для корреспонденции:

Мирошников Александр Борисович — канд. биол. наук, проф., кафедра спортивной медицины, ФГБОУ ВО Российский государственный университет физической культуры, спорта, молодежи и туризма, Российская Федерация, 105122, Москва, Сиреневый бульвар, 4; <https://orcid.org/0000-0002-4030-0302>
benedikt116@mail.ru

Corresponding author:

Miroshnikov Alexander — Candidate of Biological Sciences, prof., Department of Sport Medicine, Federal State Unitary Enterprise «Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism», 4, Syreneyevy Boulevard, Moscow, Russian Federation, 105122, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0302>
benedikt116@mail.ru

Поступила 18.12.2018